

# 新型横向磁通电机设计及其自定位力分析

史仪凯, 苏士斌, 袁小庆, 崔田田, 韩 康

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 横向磁场永磁电机具有低转速、高转矩密度的特点, 文章在介绍横向磁通永磁电机的基础上, 针对电动汽车轮毂设计了一种新型盘式横向磁通电机, 其结构简单, 成本低, 显著特点在于充分提高了永磁体和轮毂空间的利用率。随后, 对样机模型进行了自定位力三维有限元分析, 并计算了新型样机的自定位力矩, 给出了实验数据, 并与有限元仿真结果对比分析, 表明该理论研究方法的有效性和样机制作的合理性、正确性, 为进行深入研究奠定了基础。

**关 键 词:** 有限元分析, 永磁体, 自定位力, 横向磁通永磁电机

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2013) 01-0067-04

横向磁通永磁(Transverse Flux Permanent Magnet——TFPM)电机是一种具有较高转矩密度的特种电机, 在直驱型舰船电力推进和风力发电系统等领域极具发展前景。1986 年, 德国 H. Weh 教授等人提出并研制了第 1 台高推力密度横向磁通永磁电机<sup>[1]</sup>, 它采用各相独立的环形电枢绕组, 这种独特的电枢结构可以在不增加绕组匝数和磁通量的前提下, 通过增加电机的极对数大幅提高单位电枢电流产生的永磁转矩, 实现大转矩输出。

第 1 台横向磁通永磁电机至今, 已有很多科研机构研制了多种拓扑结构的样机<sup>[2-5]</sup>, 但其中很多拓扑结构在轴向体积都比较大, 不适合直接应用于电动汽车的轮毂电机。瑞典皇家技术学院样机的结构将三相布置在同一圆周上, 结构简单, 但没有采用聚磁结构。它的气隙是平面, 因此磁极端面也是平面, 易于加工, 但其线圈安装工艺性较差。上海大学江建中等人<sup>[6]</sup>研制了 1 台 4 相 15 对极的横向磁通永磁电机, 就其单相而言是盘式结构。其采用公共联接铁芯解决磁路连通问题, 但其定子和转子结构的设计和组装都很复杂, 并且公共联接铁芯与空气大面积接触, 漏磁很大。

Seyedmohsen Hosseini 等人<sup>[7]</sup>设计了 1 台盘式发电机, 获得了很好的磁路性能, 输出转矩较大, 但其自定位力矩大, 在低速运行时会产生爬坡现象, 严

重影响电机的启动性能和低速工作性能。另外, 该电机结构轴向的一定范围内没有分布永磁体和绕组, 没能充分利用电机内部空间, 且在同一时刻只有一半的永磁体得到利用。本文在 Seyedmohsen Hosseini 等人设计的 4 相平板式横向磁场永磁电机和盘式电机的基础上, 设计了两侧组合定子结构的新型盘式 TFPM 电机, 实验研究表明该结构简单, 而且提高了永磁体和电机空间的利用率, 降低了自定位力矩, 提升了横向磁场永磁电机性能。

## 1 新型盘式 TFPM 电机

本文设计的一种新型盘式横向磁通电机拓扑结构, 如图 1 所示。

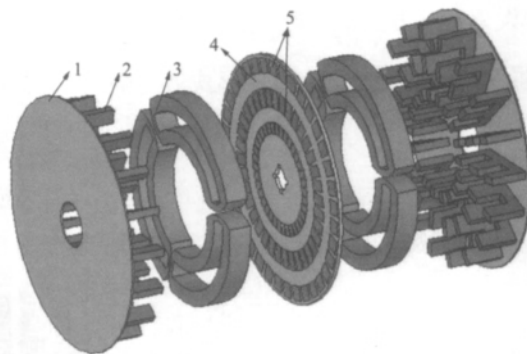


图 1 新型盘式横向磁通电机主体拓扑结构

基金项目: 国家自然科学基金(51105316)资助

收稿日期: 2012-05-40

作者简介: 史仪凯(1952—), 西北工业大学教授, 主要从事机电控制及自动化研究。

图中 1 为固定 E 型硅钢的端面板 2 为 E 型硅钢 3 为绕组 4 为转子盘 5 为永磁体。

该新型样机采用两侧组合的定子结构,两侧定子结构相同,其分布错开  $90^\circ$  电度角,克服了文献[7]自定位力矩大的缺点;该新型电机结构采用 E 型硅钢片,取代了文献[6]中公共联接铁芯,简化了结构,降低了加工难度和成本。

## 2 电磁力特性分析

静态电磁力矩特性是分析 TFPM 运行性能的基础,对 TFPM 单相通电时的力-位移特性分析具有重要的意义。

### 2.1 TFPM 电磁力分析

TFPM 单相通电时电动机的电磁力可由磁共能对位移的变化率求出。为方便分析,将永磁磁钢看成是通电流大小恒定为  $I_m$  的绕组,并做以下基本假设<sup>[8]</sup>:

- 1) 电动机磁路铁心部分的磁导率为无穷大;
- 2) 电动机磁路不饱和。

则磁共能可表示为

$$W_m = \frac{1}{2} I^2 L_{ss}(x) + I I_m L_{st}(x) + \frac{1}{2} I_m^2 L_{tt}(x) \quad (1)$$

式中,  $I$  为定子绕组电流;  $x$  为电动机转子的位移;  $L_{ss}$  为定子绕组自感;  $L_{st}$  为定子绕组和转子等效绕组间的互感;  $L_{tt}$  为转子等效绕组自感。

则单相通电时电动机的电磁力可表示为

$$F = \frac{dW_m}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL_{ss}}{dx} + I I_m \frac{dL_{st}}{dx} + \frac{1}{2} \frac{d(I_m^2 L_{tt})}{dx} \quad (2)$$

设  $F_{em} = I I_m \frac{dL_{st}}{dx}$ , 若忽略互感中高次谐波的影响,将互感  $L_{st}$  以傅里叶级数形式展开后可以得到

$$F_{em} = - I I_m L_{st} \frac{\pi}{\tau} \cdot \sin\left(\frac{x}{\tau} \cdot \pi\right) \quad (3)$$

(3) 式表示横向磁通永磁电动机单相通电时的电磁力与转子位移之间的关系。在(2)式中,当  $I=0$  时

$$F = \frac{1}{2} \frac{d(I_m^2 L_{tt})}{dx} \quad (4)$$

此时电动机所体现出的电磁力特性是自定位力特性,即自定位力是定子绕组不通电流时由转子永磁体与定子齿槽相互作用而产生的。

自定位力矩力图使电机转子定位于某一位置,它随转子空间位置的变化而呈周期性变化。从 TF-PM 组成来看,它是一种齿槽结构的永磁电动机,因而电动机中必然存在自定位力,它将导致电动机的电磁力发生波动,并影响电动机在控制系统中的低速性能和在位置控制系统中的高精度定位。传统永磁旋转电动机的理想齿槽自定位力矩的周期变化次数为电动机极数  $2p$  和槽数  $Z$  的最小公倍数<sup>[9]</sup>。对于盘式 TFPM,可认为它是一个半径为无穷大、极数为  $2N$ 、槽数为  $Z$  的传统永磁旋转电动机,其中  $N$  趋于无穷大。根据传统电动机自定位力矩的理论进行分析可知,单相 TFPM 的自定位力次数为  $2N$ 。

### 2.2 三维电磁场自定位力分析

新型横向磁通永磁电机的磁路呈三维分布,必须采用三维电磁场有限元分析与计算,采用电磁场仿真软件 MAXWELL 3D 对样机模型进行分析,可以得到不同电度角下各零件所受电磁力。图 2 是新型盘式 TFPM 样机模型的一对极在绕组中没有通入电流时的磁路示意图,该电磁力是产生自定位力的根本原因。

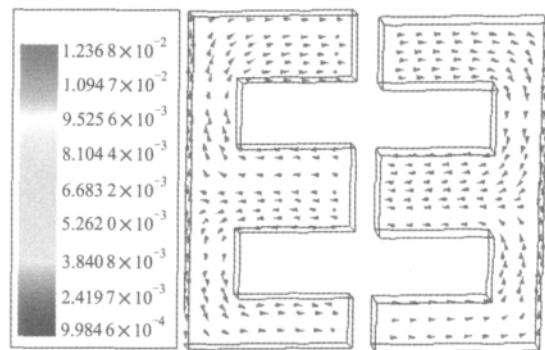


图 2 新型 TFPM 样机模型磁路图

为了消除电机模型边界和线圈端部效应等的影响,仅对模型中间一个对极的 E 型硅钢定子齿和永磁体进行电磁力分析。将三维电机模型中的转子永磁体沿着轴心每次旋转  $5^\circ$  电度角,进行静态三维有限元分析,可以得到不同电度角下各部分的电磁力,即自定位力,由自定位力在轴径方向上产生自定位力矩。

针对本文设计的新型盘式电机两侧定子结构错开  $90^\circ$  电度角,得到各电度角下的三相合成后的自定位力,如图 3 所示,图中曲线 1 表示单相自定位力矩,曲线 2 表示新型盘式电机的自定位力矩,曲线 3

表示采用文献[7]中模型进行的有限元分析结果。对上述电机模型进行步距角为 $5^\circ$ 的瞬态三维有限元分析也可以得到相同的结论。

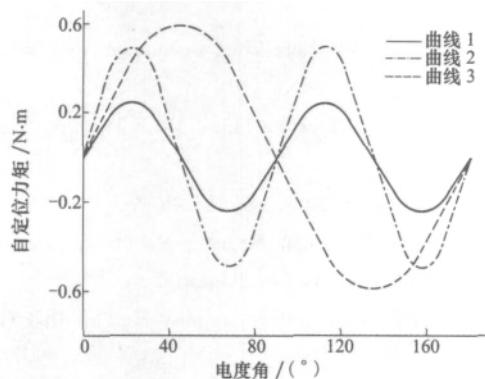


图3 样机模型自定位力矩曲线图

### 3 样机静态自定位力矩实验

基于上述理论分析及进行的三维有限仿真实验,本课题组设计并制作了1台两侧组合定子的盘式TFPM实验样机,如图4所示,嵌放于转子盘上的每相邻的2个永磁体极性相反。样机主要设计参数为:相数 $m=3$ ,气隙 $L_\delta=1\text{mm}$ , $p=12$ , $P_N=800\text{W}$ , $U_N=24\text{V}$ , $n_N=600\text{r/min}$ 。

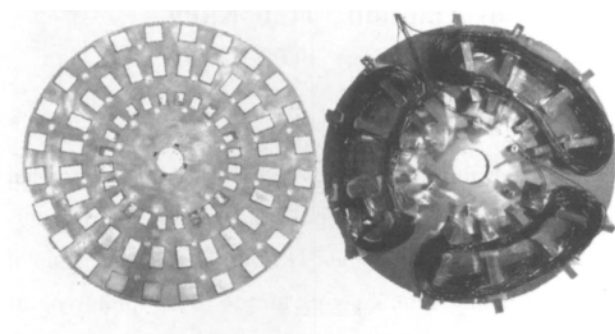


图4 新型TFPM样机转子和单侧定子图

对该样机进行步距角为 $5^\circ$ 的静态自定位力矩测试,实验结果如图5所示。

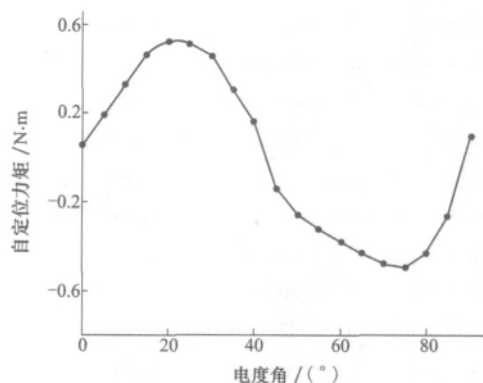


图5 新型TFPM样机自定位力矩曲线图

可以看出,该实验结果曲线与三维有限元分析的结果基本吻合,基本按正弦规律变化,波形周期等参数基本相同,说明了上述磁场分析的正确性,为下一步进行深入盘式TFPM研究奠定了良好的基础。

实验结果曲线与三维有限元分析结果之间存在差别的主要原因有4个:①样机绕组绕制不均匀;②嵌放于永磁体嵌板中的永磁体平整度没有很好的保证;③由于多次机械加工误差的存在,使得气隙大于 $1\text{mm}$ ;④由于轴承的摩擦力及其它因素存在,使得实验结果沿纵轴上移。

### 4 结 论

横向磁通永磁电机具有设计灵活、转矩密度高、电磁解耦、控制方便等特性,特别适合于要求低速、大转矩、直接驱动の場合。本文灵活地将横向磁通电机设计为盘式结构,有利于充分发挥电动汽车轮毂的空间作用,产生更强的电磁转矩;该样机采用了双边定子组合结构,结构简单,加工方便,具有永磁体和空间利用率高等特点。本文对设计的样机模型和样机分别进行了自定位力矩分析,结果基本吻合,证明了上述分析方法的有效性和样机设计的正确性。目前,我国正在大力研究横向磁通永磁电机和电动汽车,相信上述研究和进一步的研究会为我国在以上领域的研究奠定一定的基础。

### 参考文献:

- [1] Wang Huan, Shi Yika, Lu Jiankang. Design and Application of New Topology of Transverse Flux Permanent-Magnet Motor with Driving System. Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics, 2010, 294-297
- [2] 王 萑, 史仪凯, 袁小庆. 新型小功率平板式TFPM设计研究. 机械科学与技术, 2010, 29(3): 308-311

- Wang Huan , Shi Yika , Yuan Xiaoqing. Design of a New Low Power Flat Type Transverse Flux Permanent Magnet Motor. *Mechanical Science and Technology* , 2010 , 29( 3 ) : 308-311 ( in Chinese )
- [3] Bao G Q. A Modular Multiphase Permanent Magnet Machine Optimization for Direct Propulsion Systems. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference ( VPPC )* , 2008
- [4] Bellucci M , Cimino V L , Rizzo R. A Transverse Flux Permanent Magnet Machine for Micro-Wind Generation Application. *International Conference on Clean Electrical Power ( ICCEP )* , 2011 , 802-806
- [5] Lu Kaiyuan , Peter Om , et al. Design Considerations of Permanent Magnet Transverse Flux Machines. *IEEE Trans on Magnetic* , 2011 , 47( 10 ) : 2804-2807
- [6] 李永斌 , 袁 琼 , 江建中. 一种新型聚磁式横向磁场永磁电机研究. *电工技术学报* 2003 , 18( 5 ) : 46-49  
Li Yongbin , Yuan Qiong , Jiang Jianzhong. Research on a Novel Transverse Flux Permanent Magnetic Machine with a Concentrated Flux Rotor. *Transactions of China Electro Technical Society* , 2003 , 18( 5 ) : 46-49 ( in Chinese )
- [7] Seyedmohsen Hosseini. Design , Prototyping , and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator. *IEEE Trans on Magnetics* , 2011 , 47( 4 ) : 772-780
- [8] 卢健康 , 王 崔 , 王声钊. 三种平板式横向磁场永磁电机的电磁场有限元分析对比与实验研究. *机械科学与技术* 2009 , 28( 9 ) : 1135-1138  
Lu Jiankang , Wang Huan , Wang Shengzhao. Electromagnetic Finite Element Analysis and Comparison of Three Types of Transverse Flux Permanent Magnet Motors and Experimental Research. *Mechanical Science and Technology* , 2009 , 28( 9 ) : 1135-1138 ( in Chinese )
- [9] Wang Huan , Shi Yikai , Tang Bo. An Investigation of Four-Phase Flat-Type TFPM and Control System. *Fourth International Conference on Innovative Computing , Information and Control* , 2009 , 476-479

## Designing Novel Transverse Flux Permanent Magnet ( TFPM ) Motor and Analyzing Its Cogging Torque

Shi Yikai , Su Shibin , Yuan Xiaoqing , Cui Tiantian , Han Kang

( School of Mechanical Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China )

**Abstract:** A TFPM motor has the characteristics of low speed and high torque density. Therefore , we design what we believe to be a novel TFPM motor that can make full use of the permanent magnet and space in an electric vehicle wheel and has rotors at both sides , simple structure and low cost. We perform the 3D finite element analysis of the cogging torque of its prototype and calculate it. Finally , we tested the static cogging torque of the prototype as shown in Fig. 4. The test results , given in Fig. 5 , and their analysis show preliminarily that the test curve is basically in agreement with the 3D finite element analysis results , indicating that the prototype design and its 3D finite element analysis are correct , thus laying a solid foundation for the further development of TFPM motor.

**Key words:** finite element method , permanent magnets; cogging torque , transverse flux permanent magnet ( TFPM ) motor